

CO₂ -Messung in Inkubatoren – Fragen und Antworten



Häufig gestellte Fragen

1. Wie arbeitet der CARBOCAP™ NDIR-Sensor (nichtdispersives Infrarot) in Einstrahl-Bifrequenztechnik?
2. Welchen Einfluss haben Temperatur und Druck auf die CO₂ -Messung?
3. Wie lassen sich temperatur- und druckbedingte Fehler korrigieren, wenn CO₂ -Messgeräte von Vaisala eingesetzt werden?
4. Wie kann Kondensatbildung bei der Probenahme aus Inkubatoren verhindert werden?
5. Warum ist die angezeigte CO₂ -Konzentration bei einer Probenahme mittels Pumpe und Trocknungsschlauch höher als erwartet?

In diesem Dokument sollen die am häufigsten gestellten Fragen zur CO₂ -Messung und den dafür eingesetzten Produkten beantwortet werden.

1. Wie arbeitet der CARBOCAP™ NDIR-Sensor (nichtdispersives Infrarot) in Einstrahl-Bifrequenztechnik?

Der Vaisala CARBOCAP™ -Sensor besteht aus drei wesentlichen Komponenten: einer Lichtquelle, einem Interferometer und einem Infrarotsensor. Die Lichtquelle ist in einer feststehenden Entfernung zum Infrarotsensor angeordnet, der die Lichtintensität misst.



Das von der Lichtquelle abgestrahlte Licht wird bei einer bestimmten Wellenlänge durch das im Gas enthaltene CO₂ absorbiert. Das FPI filtert alle anderen Wellenlängen heraus, so dass sich die Lichtintensität am Infrarotsensor als Funktion der in der Messzelle enthaltenen Menge an CO₂ ändert.

Vor dem Infrarotsensor befindet sich ein Fabry-Perot Interferometer (FPI). Bei diesem FPI handelt es sich um ein abstimmbares Filter, das nur bestimmte Wellenlängen zum Sensor durchlässt. Kohlendioxid wiederum absorbiert nur bestimmte Wellenlängen des Lichts, und das FPI-Filter ist so ausgelegt, dass es Licht mit der von CO₂ absorbierten Wellenlänge (4,26 µm) und einer angrenzenden nicht-absorbierten Wellenlänge passieren lässt. Siehe Darstellung links.

Während des Betriebs wechselt das FPI fortlaufend zwischen diesen beiden Wellenlängen. Bei der durch die CO₂-Absorption betroffenen Wellenlänge wird die Lichtintensität in Verhältnis zur CO₂-Konzentration im Lichtweg reduziert. Die Lichtintensität im nicht-absorbierten Wellenlängenbereich dient dabei als Vergleichswert.



Das FPI ist auf eine angrenzende, nichtabsorbierte Referenzwellenlänge abgestimmt, bei der der Infrarotsensor die volle Lichtintensität misst und damit eine Vergleichsgrundlage schafft. Jede Veränderung in der Leistung der Lichtquelle, des FPI oder des Infrarotsensors beeinflusst die Messungen gleichermaßen und hält die Kalibrierung des Sensors aufrecht, indem sie den Unterschied zwischen beiden Messungen beibehält. Hier liegt der Schlüssel für die Langzeitstabilität des Sensors.

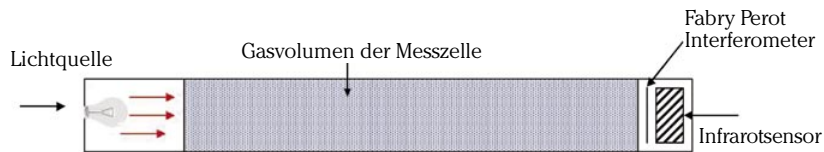
Mit schwankender CO₂-Konzentration schwankt auch die Lichtintensität. Das exakte Verhältnis zwischen der Intensität des Infrarotlichts und der Volumenkonzentration des CO₂ wird durch die Kalibrierung des Gerätes mit reinem Stickstoff (0 ppm CO₂) und einer bekannten Referenzkonzentration festgelegt.

Mit nur einer Lichtquelle und einem Infrarotsensor ist der CARBOCAP™ einfach und robust aufgebaut. Damit werden Fehler auf Grund kleinerer Abstimmungsprobleme, wie sie bei Zweistrahl-Sensoren mit mehreren Komponenten auftreten, vermieden. Das im CARBOCAP™-Sensor verwendete FPI ist mikromechanisch aus Silizium hergestellt und hat keine beweglichen Teile. Das Filter bietet dadurch eine wesentlich höhere Zuverlässigkeit als das traditionelle, mechanische Rotationsfilterrad.

2. Welchen Einfluss haben Temperatur und Druck auf die CO₂-Messung?

Alle nicht-dispersiven Infrarotmessgeräte basieren auf der Messung der Molekdichte (Anzahl der Moleküle im optischen Weg des Strahls). Die meisten Anwender bevorzugen jedoch die Ergebnisanzeige in Volumenprozent. Aus diesem Grund werden CO₂-Messgeräte so justiert, dass die Anzahl der Moleküle mit einer bekannten CO₂-Volumenkonzentration korreliert.

Da Gase komprimierbar sind, variieren deren Molekdichten bei wechselndem Umgebungsdruck und wechselnder Umgebungstemperatur. Aus diesem Grund sind die Messergebnisse temperatur- und druckabhängig, wie folgende Abbildung verdeutlicht.



Die blauen Punkte stellen die in der Luft enthaltenen CO₂-Moleküle auf Meeresspiegelhöhe dar.



Mit zunehmender Höhe und sinkendem Druck wird der gleiche Raum von weniger CO₂-Molekülen in Anspruch genommen, auch wenn der prozentuale Anteil von CO₂ im Verhältnis zu anderen Gasen gleich geblieben ist. Da NDIR-Sensoren die Moleküle im optischen Messweg „zählen“, sollte die Messung druckkorrigiert werden, um eine brauchbare Anzeige in % CO₂ zu erhalten; die Messwerte wären ansonsten stets zu niedrig.

Eine CO₂-Messung sollte stets korrigiert werden, wenn die Messbedingungen erheblich von den Kalibrierbedingungen bei 1013 hPa und +25 °C abweichen. Aus den Tabellen 1 und 2 lässt sich ablesen, welchen Einfluss nichtkorrigierte Änderungen von Druck und Temperatur nach dem idealen Gasgesetz haben.

Um die Notwendigkeit der Kompensation besser zu verstehen, ist es hilfreich, zunächst etwas über das Verhalten von Gasen zu wissen. In einem Gasgemisch entspricht der Gesamtgasdruck der Summe der Partialdrücke der einzelnen Gaskomponenten. Dies entspricht dem Daltonschen Gesetz und wird in folgender Formel ausgedrückt:

$$P_{\text{total}} = P_1 + P_2 + P_3 \dots$$

Die Menge eines Gases in einem Gasgemisch kann auch als Druck angegeben werden. Da sich Luft aus den Hauptkomponenten Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid und Wasserdampf zusammensetzt, kann somit der gesamte Umgebungsluftdruck aus den Teildrücken dieser drei Gase gebildet werden. Der Partialdruck eines jeden Gases ist das Produkt aus seiner Volumenkonzentration und dem Gesamtdruck des Systems.

Unsere Atemluft setzt sich aus ca. 78 % Stickstoff, 21 % Sauerstoff, 0,9 % Argon und annähernd 0,04 % Kohlendioxid zusammen. Diese prozentuale Verteilung ist an allen Orten in der Atmosphäre ungefähr gleich, unabhängig von der Höhe.

Der durchschnittliche Atmosphärendruck auf Meeresspiegelhöhe beträgt 1013 hPa, damit errechnet sich der Partialdruck des Kohlendioxids in der Luft zu 0,04 % von 1013 hPa (0,0004 x 1013) = 0,405 hPa. In Denver, Colorado, USA, beispielsweise beträgt auf einer Höhe von ca. 5.280 Fuß der atmosphärische Druck ungefähr 834,3 hPa. Für den gleichen Kohlendioxidanteil in der Luft von 0,04 % errechnet sich der Partialdruck mit 0,334 hPa gegenüber 0,405 hPa im vorstehenden Beispiel.

Bei gleichbleibendem Anteil des Kohlendioxids in der Atmosphäre von 0,04 % ist der Druck in dieser Höhe geringer. Bei geringerem Druck hingegen sinkt die Moleküldichte. Da NDIR-Sensoren genau diese Moleküldichte messen, muss die Messung kompensiert werden, wenn das Messergebnis in Volumen-% oder ppmv stimmen soll. Weiterhin ist eine Temperaturkompensation erforderlich, da bei sinkender Temperatur die Moleküldichte zunimmt.

Tabelle 1 Einfluss nicht-kompensierter Druckänderungen auf das %CO₂-Messergebnis von NDIR-Sensoren nach dem idealen Gasgesetz

Bei +25 °C und 1013 hPa kalibrierte Messgeräte					
Höhe über Meeresspiegel		Druck (hPa)	Gemessene Konzentration (%CO ₂)	Korrigierte Konzentration (%CO ₂)	Differenz (%CO ₂)
Fuß	Meter				
0	0	1013	5,00	5,00	0,00
500	153	992,8	4,90	5,00	0,10
1000	305	979,1	4,83	5,00	0,17
1500	458	958,4	4,73	5,00	0,27
2000	610	937,7	4,63	5,00	0,37
2500	763	923,9	4,56	5,00	0,44
3000	915	903,2	4,46	5,00	0,54
3500	1068	889,4	4,39	5,00	0,61
4000	1220	868,7	4,29	5,00	0,71
4500	1373	854,9	4,22	5,00	0,78
5000	1526	834,3	4,12	5,00	0,88
5500	1679	820,5	4,05	5,00	0,95
6000	1831	806,7	3,98	5,00	1,02

Tabelle 2 Einfluss nicht-kompensierter Temperaturänderungen auf das % CO₂-Messergebnis von NDIR-Sensoren nach dem idealen Gasgesetz

Bei +25 °C und 1013 hPa kalibrierte Messgeräte			
Temperatur (°C)	Gemessene Konzentration (%CO ₂)	Korrigierte Konzentration (%CO ₂)	Differenz (%CO ₂)
25	5,00	5,00	0,00
26	4,98	5,00	0,02
27	4,97	5,00	0,03
28	4,95	5,00	0,05
29	4,93	5,00	0,07
30	4,92	5,00	0,08
31	4,90	5,00	0,10
32	4,89	5,00	0,11
33	4,87	5,00	0,13
34	4,85	5,00	0,15
35	4,84	5,00	0,16
36	4,82	5,00	0,18
37	4,81	5,00	0,19

3. Wie lassen sich temperatur- und druckbedingte Fehler korrigieren, wenn CO₂-Messgeräte von Vaisala eingesetzt werden?

Kohlendioxidmessungen, die bei erheblich von den Kalibrierbedingungen abweichenden Temperaturen und Drücken durchgeführt werden, sollten korrigiert werden, um die gewünschte Genauigkeit zu erreichen. Die einfachste Form der Korrektur für ein Ergebnis in Volumen-% ist die Anwendung einer dem idealen Gasgesetz entsprechenden Formel:

$$c_{\text{korrigiert}}(\%/ppm) = c_{\text{gemessen}}(\%/ppm) \cdot \frac{1013 \cdot (t(^{\circ}\text{C}) + 273)}{(298\text{K} \cdot p(\text{hPa}))}$$

Beim portablen Vaisala CARBOCAP™ CO₂-Messgerät GM70 können Umgebungstemperatur und -druck am Messpunkt einfach über das Benutzermenü eingegeben werden. Die Kompensation erfolgt intern, und das Messgerät zeigt den korrigierten Messwert an. Die interne Korrektur berücksichtigt dabei auch die von realen Gasen verursachten Abhängigkeiten sowie die elektronischen und optischen Komponenten des Messgeräts. Die interne Korrektur des GM70 ist genauer als die Korrektur nach dem idealen Gasgesetz.

Ein anderer Weg der Temperaturkompensation wird durch die Verbindung einer Vaisala HUMICAP® Feuchte- und Temperatursonde HMP77B mit der CO₂-Sonde des Handmessgerätes MI70 geboten. Die mit der Sonde gemessene Temperatur kann so zur automatischen Kompensation des CO₂-Anzeigewertes genutzt werden.

Bei der Vaisala CARBOCAP™ CO₂-Messwertgeberserie GMT220 und der Vaisala CARBOCAP™ CO₂-Modulserie GMM220 kann die Kompensation auch intern vorgegeben werden. Die Einstellungen lassen sich mithilfe eines angeschlossenen PCs leicht verändern. GMT220 und GMM220 werden dafür mithilfe eines seriellen Schnittstellenkabels und eines Adapters (Teile-Nr. 19040GM) mit dem Computer verbunden.

Das Vaisala CARBOCAP™ CO₂-Messmodul GMM111 misst CO₂-Konzentrationen bis zu 20 %. Bei diesem Modell gibt es jedoch keine Möglichkeit einer internen Kompensation.



Das Vaisala GM70 mit Feuchte- / Temperatursonde und Kohlendioxidsonde.

4. Wie kann Kondensatbildung bei der Probenahme aus Inkubatoren verhindert werden?

Das GM70 bietet zwei Möglichkeiten der Gasprobenahme: die Diffusions- und die Pumpenaspiration. Die Probenahme mittels Pumpe ist für Anwendungen vorgesehen, bei denen auf Diffusion beruhende direkte Messungen nicht möglich sind.

Der Entnahme von Gasproben aus feuchten Umgebungen ist besondere Aufmerksamkeit zu schenken, da an den optischen Oberflächen des NDIR-Sensors im Inneren der Sonde und in der Pumpenkammer keine Kondensation auftreten darf.

Inkubatoren und Klimakammern stellen besondere Herausforderungen dar, da hier die Gasprobe gewöhnlich aus Umgebungen mit hohen Temperaturen und hohen Feuchten in Umgebungen mit Raumtemperatur gezogen wird und es dadurch zur Kondensatbildung kommt.



Das Vaisala GM70 wird zur Bestimmung der CO₂-Konzentration in Inkubatoren eingesetzt.

Kondensatbildung im Inneren des Schlauch- und Probenahmesystems kann durch Verwendung von Trocknungsschläuchen aus Nafion® verhindert werden (als Zubehör unter der Vaisala Teile-Nr. 212807GM erhältlich).



*Nafion® Schlauch,
Vaisala Teile-Nr.
212807GM*

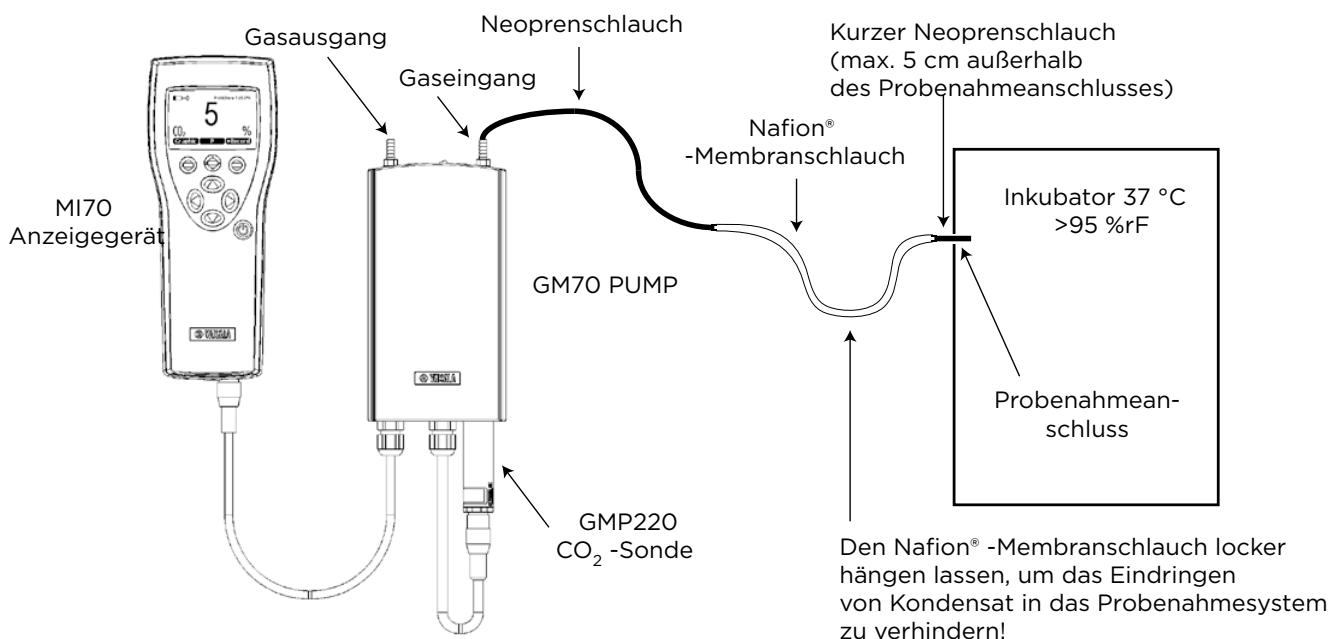
Kernbestandteil des Schlauchs ist Nafion[®]¹, das durch seine hohe Selektivität Wasser von Gas trennt. In einem als Pervaporation bezeichneten Prozess durchdringt das Wasser die Membranwand und verdampft auf der anderen Seite in die Umgebungsluft. Nafion[®] scheidet Wasser durch Absorption, einer kinetischen Reaktion 1. Ordnung, ab. In Trocknungsanwendungen überführt der Feuchtetauscher den Wasserdampf aus einem feuchten Gas in die Umgebungsluft. Der Trocknungsprozess ist abgeschlossen, wenn die Feuchte der Probe gleich der Feuchte der Umgebungsluft ist. Da der Trocknungsprozess als kinetische Reaktion 1. Ordnung abläuft, kann dieser Zustand extrem schnell erreicht werden, gewöhnlich innerhalb von 100 bis 200 Millisekunden. Diese Eigenschaft macht den Nafion[®]-Schlauch zu einer idealen Anwendung beim Einleiten einer Probe mit hohem Feuchtegehalt in eine Umgebung mit Raumtemperatur. Die Feuchte des Gases kann dabei mit einer kurzen Schlauchführung vermindert werden. Weitere Informationen dazu finden Sie unter www.permapure.com.

¹ Nafion[®] ist ein Co-Polymer der Tetrafluorethylen (Teflon) und Perfluor-3,6-dioxa-4-methyl-7-oktansulfosäure von Dupont.

Beim Einsatz der GM70 Membranpumpe zur Probenahme aus einem Inkubator wird die Verwendung eines Nafion[®]-Trocknungsschlauchs empfohlen, um eine mögliche Kondensatbildung im Probenahmesystem zu vermeiden. Folgende Empfehlungen sollten dabei beachtet werden:

- An der Übergangsstelle zwischen Inkubator und Umgebung sollte ein Nafion[®]-Schlauch angeordnet werden. Um den Wasserdampf aus der gezogenen Probe in die Raumumgebung abzuscheiden, sind 20 cm Nafion[®]-Membran ausreichend. Die übrige Strecke des Probenahmeschlauchs kann dann aus Neopren oder einem anderen Material bestehen. Der Schlauchanschluss sollte mit einer gesicherten Schlauchtülle erfolgen, um das Eindringen von Umgebungsluft in die Probe zu verhindern. Die Gesamtlänge der Probenahmeleitung sollte so kurz wie möglich gehalten werden.
- Werden die Proben durch die Inkubatortür hindurch genommen, muss die Tür nach dem Einsetzen des Nafion[®]-Schlauchs in den Inkubator vorsichtig geschlossen werden. Dabei ist sicherzustellen, dass Türdichtung und Schlauch nicht beschädigt werden.
- Wird die Probe aus einer Kammer gezogen, sollten einige Zentimeter der Probenahmeleitung in der Kammer platziert werden. Besteht das Risiko der Kondensatbildung in der Kammer, muss Vorsorge getroffen werden, dass das Kondensat nicht in den Probenahmeschlauch laufen kann.
- Zur Kontrolle, dass kein Kondensat bis zur Sonde vorgedrungen ist, sollte die CO₂-Sonde aus dem Pumpengehäuse gezogen werden. Beim Einsetzen der Sonde diese nicht bis ganz zum Ende einschieben! Die beiden O-Ringe müssen zusammen mit der glatten Sondenoberfläche eine feste Verbindung bilden.

Probenahmesystem mit einem Nafion[®]-Membranschlauch



- Erfolgt die Probenahme durch eine andere Öffnung im Inkubator, muss die Durchführung des Nafion®-Schlauchs abgedichtet werden.
- Erfolgt die Probenahme über einen Anschluss mit Schlauchtülle sollte ein sehr kurzes Stück Neoprenschlauch für die Verbindung zwischen Nafion®-Schlauch und Schlauchanschluss verwendet werden. Der Neoprenschlauch dient nur als flexibler Verbinder, um den Nafion®-Schlauch so nahe wie möglich an der Schlauchtülle zu positionieren. Die Gasprobe sollte wegen der Wahrscheinlichkeit der Kondensatbildung nicht durch den Neoprenschlauch strömen.
- Die GM70 Membranpumpe sollte sicherheitshalber über dem Probenahmeanschluss angeordnet werden. Kommt es zur Kondensatbildung in der Probenahmeleitung, wird dadurch eine Beschädigung der CO₂-Sonde durch Wasser verhindert.

5. Warum ist die angezeigte CO₂-Konzentration bei einer Probenahme mittels Pumpe und Trocknungsschlauch höher als erwartet?

Wird ein Nafion®-Schlauch zur Trocknung der Gasprobe eingesetzt, liegt die CO₂-Konzentration in der trockenen Probe etwas höher als in der feuchten Probe. Dies ist auf ein Phänomen zurückzuführen, das mit Dilution bezeichnet wird. Die CO₂-Dichte im Inkubator wird durch das vom Wasserdampf beanspruchte Volumen „herabgesetzt“. Wird der Probe hingegen der Wasserdampf entzogen, steigen die Anteile der anderen Gase wieder an, einschließlich des CO₂.

Die Verdünnungs-Koeffizienten für die Gaskonzentration für die Trocknung einer Gasprobe sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Der Taupunkt (bei 1013 hPa) der Gasprobe im Inkubator wird auf der horizontalen Achse und der Taupunkt der Gasprobe am Messpunkt wird auf der vertikalen Achse ausgewählt. Der Taupunkt der Gasprobe am Messpunkt kann mithilfe einer Feuchteprobe (HMP75B, HMP76B oder HMP77B) bestimmt werden.

Tabelle 3 Verdünnungskoeffizienten

Td (°C)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60
-60	0,9999	0,9996	0,999	0,997	0,994	0,988	0,977	0,958	0,927	0,878	0,803
-50	0,9999	0,9997	0,999	0,997	0,994	0,988	0,977	0,958	0,927	0,878	0,803
-40	1,0000	0,9998	0,999	0,998	0,994	0,988	0,977	0,958	0,927	0,878	0,803
-30		1,0000	0,999	0,998	0,994	0,988	0,977	0,958	0,928	0,879	0,804
-20			1,000	0,998	0,995	0,989	0,978	0,959	0,928	0,879	0,804
-10				1,000	0,997	0,990	0,979	0,961	0,930	0,881	0,806
0					1,000	0,994	0,983	0,964	0,933	0,884	0,809
10						1,000	0,989	0,970	0,939	0,890	0,815
20							1,000	0,981	0,950	0,901	0,826
30								1,000	0,969	0,920	0,845
40									1,000	0,951	0,876
50										1,000	0,925
60											1,000

Beispiel: Eine Gasprobe wird aus einer Umgebung mit 40 °C (Td) entnommen und in eine Umgebung mit 10 °C (Td) eingebracht, in der die Messung 5,32 %CO₂ ergibt. In der Umgebung mit 40 °C (Td) entspricht dies einer Konzentration von 5 %CO₂ ($5,32 \% \cdot 0,939 = 5,00 \%$), da der höhere Feuchtegehalt die Probe verdünnt.